13- PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ

THOMAS YOUNG
(1773 – 1829)

Los colores en muchas de las plumas de un colibrí no se deben al pigmento. La *iridiscencia que provoca los colores refulgentes que con* frecuencia aparecen en la garganta y pecho del ave se debe a un efecto de interferencia causado por las estructuras de las plumas. Los colores varían dependiendo del ángulo de vista.

Un prodigio!!!
A los 2 años leía, a los 4 había leído la Biblia dos veces, a los 14 sabía 8 idiomas!!

Interferencia y fuentes coherentes

Principio de superposición: la perturbación total ondulatoria en un punto cualquiera es la suma de las perturbaciones debidas a las ondas individuales.
Para poder visualizar la superposición de la luz y su **patrón de interferencia** las ondas luminosas deben cumplir estas condiciones:

monocromáticas es decir de una sola longitud de onda (o frecuencia)

coherentes es decir deben mantener la fase constante respecto de otra.

y tener la misma ***polarización lineal*** *(por ejemplo el campo eléctrico debe oscilar en el mismo plano y dirección) ya que* las ondas electromagnéticas son transversales.

Lograr interferencia en ondas de sonido es mucho más sencillo que en la luminosas. En las sonoras alcanza tener una fuente sonora de una sola frecuencia emitidas por dos altavoces colocados uno al lado del otro y activados por un solo amplificador de modo que interfieran entre sí porque los dos altavoces son coherentes, es decir, responden al amplificador de la misma forma en el mismo tiempo y no son transversales.

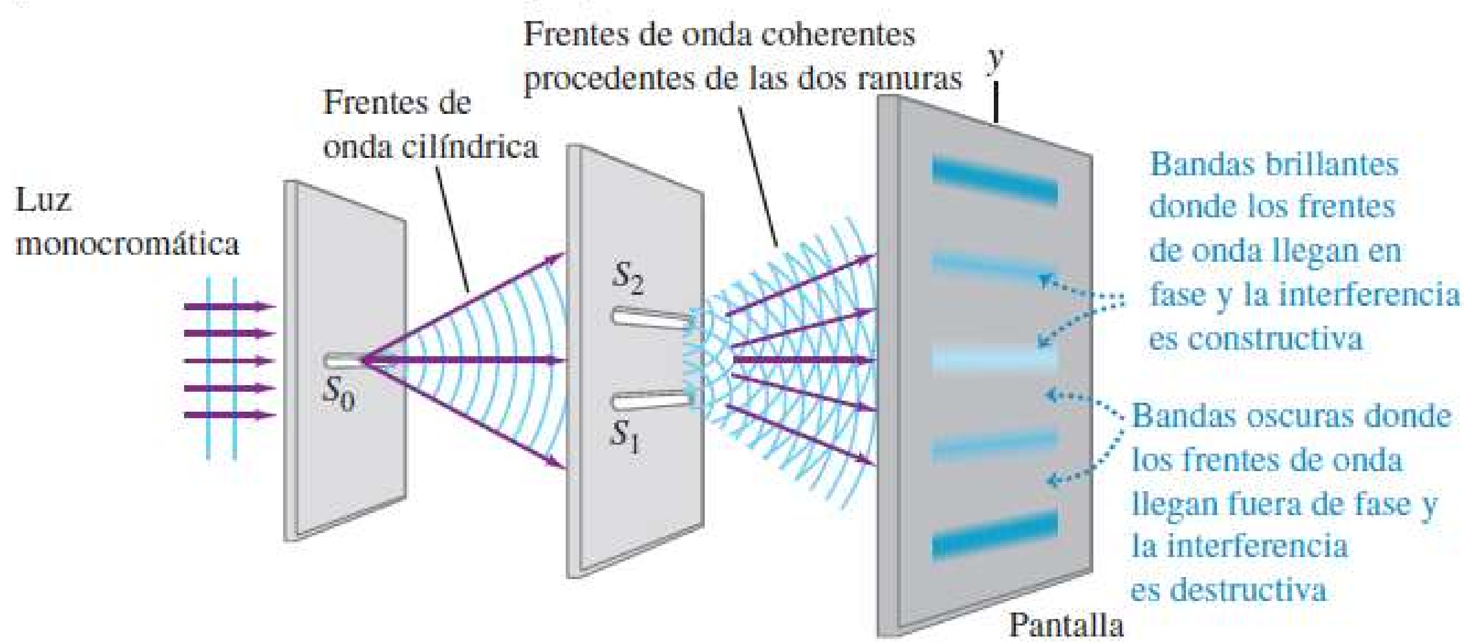
Sean dos fuentes S_1 *y* S_2 *de igual amplitud y longitud de* onda y con la misma polarización a lo largo de un mismo eje *y* equidistantes del origen.
La superposición de las ondas provenientes de estas fuentes, en distintos puntos dependerá de la diferencia Δr de las distancias recorridas (r_1 desde S_1 y r_2 desde S_2). Por ejemplo cuando Δr es un número entero de longitudes de onda, las ondas lleguan en fase y hay **interferencia constructiva,** ya que llegan dos máximos juntos.

Interferencia de luz procedente de dos fuentes

Primer experimento de interferencia de la luz de dos fuentes: Thomas Young (1801).

Montaje de Young: Fuente monocromática emite luz , se dirige a pantalla que con ranura angosta S_0, *(aprox.1 mm) que ilumina otra pantalla con* 2 ranuras S_1 *y* S_2*, de ancho aprox. de 1 μm* separadas una distancia del orden del milímetro.

a) Interferencia de las ondas de luz que pasan a través de dos ranuras



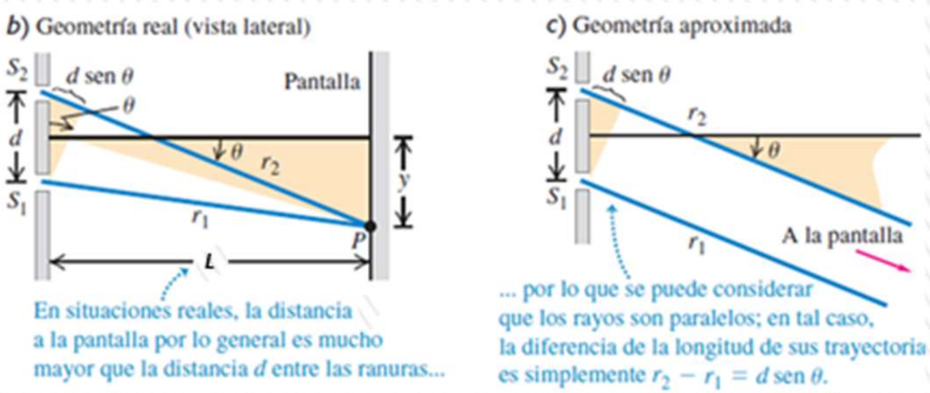
De S_0 *salen ondas que llegan a* S_1 *y* S_2 *en fase porque recorren* distancias iguales desde S_0*. Por lo tanto, las ondas que emergen de las ranuras* S_1 *y* S_2 *también están en fase siempre, por lo que* S_1 *y* S_2 *son fuentes coherentes.*

La interferencia de las ondas de S_1 *y* S_2 *genera un patrón en el espacio como el que aparece* a la derecha de las fuentes en las figura.

Para visualizar el patrón de interferencia, se coloca una pantalla a más de un metro de manera que la luz procedente de S_1 *y* S_2 *incida sobre ella.*

Simulación:
https://ophysics.com/l5.html

Interferenciade la luz procedente de dos fuentes



La intensidad es máxima en los puntos *P* de la pantalla en donde hay interferencia constructiva, será más oscura en los puntos donde la interferencia es destructiva. Suponemos que la distancia *L* de las ranuras a la pantalla es tan grande en comparación con la distancia *d entre las ranuras,* que las líneas de *S_1 y S_2 a P son casi paralelas.* *La* diferencia de la longitud de las trayectorias está dada por:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin\theta$$

θ ángulo entre una línea desde centro de las ranuras a la pantalla *y la normal al plano de las* ranuras.

Interferencia constructiva y destructiva con dos ranuras

Interferencia constructiva: en puntos donde diferencia de las trayectorias es un número entero de longitudes de onda, *mλ, m = 0, ±1, ± 2, ± 3, …*
las regiones brillantes en la pantalla *se presentan en ángulos θ en los que:*

$$d \sin\theta = m\lambda \qquad m = 0;\ \pm1;\ \pm2;\ \pm3\ \ldots$$

interferencia constructiva, dos ranuras

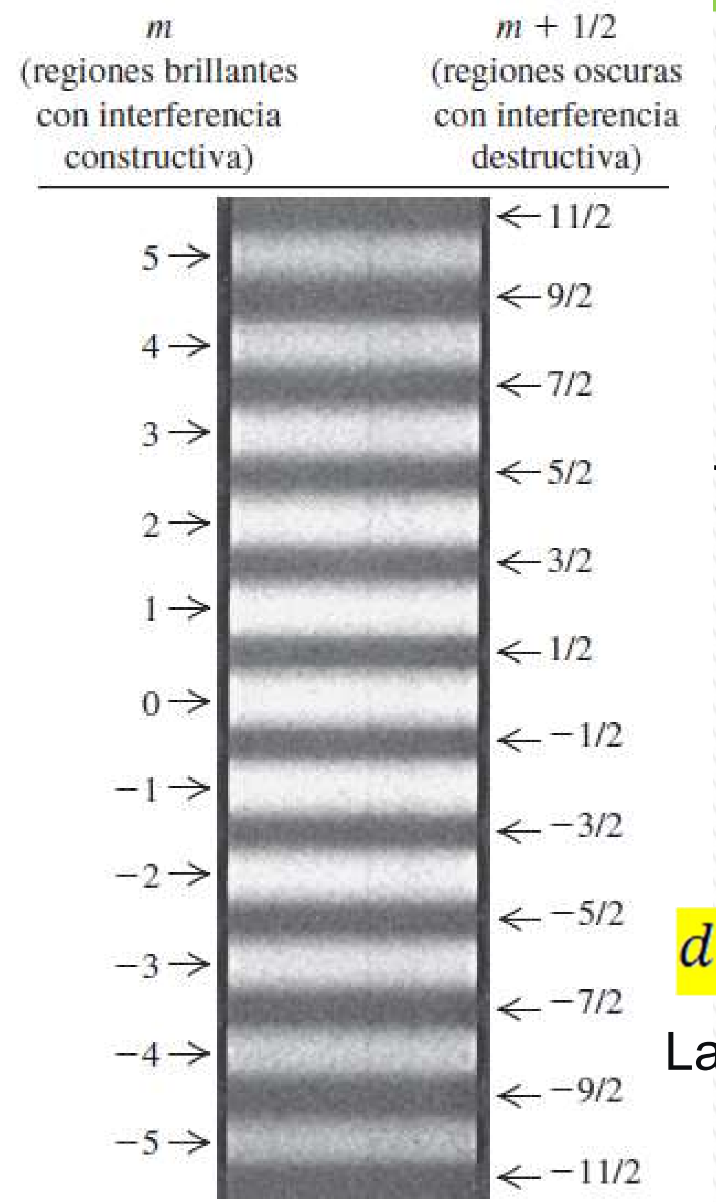
Interferencia destructiva: regiones oscuras en la pantalla en puntos para los que la diferencia de las trayectorias es un número semi-entero de longitudes de onda

$$d \sin\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad m = 0;\ \pm1;\ \pm2;\ \pm3\ \ldots$$

interferencia destructiva, dos ranuras

Estos resultados son válidos para *cualquier tipo de* onda, siempre y cuando la onda resultante de las dos fuentes coherentes se ubique en un punto que esté muy alejado en comparación con la separación *d.*

Interferenciade la luz procedente de dos fuentes



Patrón en pantalla: *sucesión de bandas* brillantes y oscuras, o **franjas de interferencia, paralelas a las ranuras S_1 y S_2.**

El centro del patrón es una banda brillante que corresponde a *m = 0; este punto de la pantalla es* equidistante a las dos ranuras.

y_m *distancia entre* el centro del patrón ($\theta = 0$) al centro de la *m-ésima banda brillante.*

θ_m *valor* correspondiente de θ; así que:

$$y_m = L \tan \theta_m$$

Como $y_m \ll L$, *y* θ_m *es muy pequeño,*

tan $\theta_m \cong$ *sen* θ_m,

Entonces para ángulos pequeños:

$$y_m = L\frac{m\lambda}{d}$$

$$d \sin\theta = m\lambda$$

$$\frac{d y_m}{L} = m\lambda$$

La separación entre franjas consecutivas:

$$\Delta y = \frac{L}{d}\lambda$$

es la misma para máximos y mínimos

Es posible medir *L y d, así como las posiciones* y_m *de las franjas brillantes, por lo que* este experimento permite una medición directa de la longitud de onda λ.

El experimento de Young fue, de hecho, fue la primera medición directa de las longitudes de onda de la luz.

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.1

Una pantalla de observación está puesta a una distancia de 1,2 m de una fuente de doble rendija. Si la distancia entre las dos rendijas es de 0,030 mm y la franja brillante de segundo orden está a 4,5 cm de la línea central,

a) determinar la longitud de onda de la luz

b) calcular la distancia entre franjas brillantes adyacentes.

L= 1,2 m d= 0,030 mm = $3{,}0\times10^{-5}$ m y_{2MAX} = 4,5 cm = $4{,}5\times10^{-2}$ m

$$y_{brillante} = L\left(\frac{m\lambda}{d}\right)$$

$$y_{2MAX} = L\left(\frac{2\lambda}{d}\right) \Rightarrow \lambda = \frac{d.y_{2MAX}}{2L} = \frac{4{,}5\times10^{-2}(3{,}0\times10^{-2})}{2(1{,}2)} = 5{,}625\times10^{-7}\,m$$

λ = 5,6×10^{-7} m

b) Como los ángulos son pequeños, el espaciamiento entre franjas brillantes se puede tomar como lineal

$$\Delta y = \frac{y_{2MAX}}{2} = \frac{4{,}5\ cm}{2} = 2{,}25\ cm$$

Δy = 22 mm

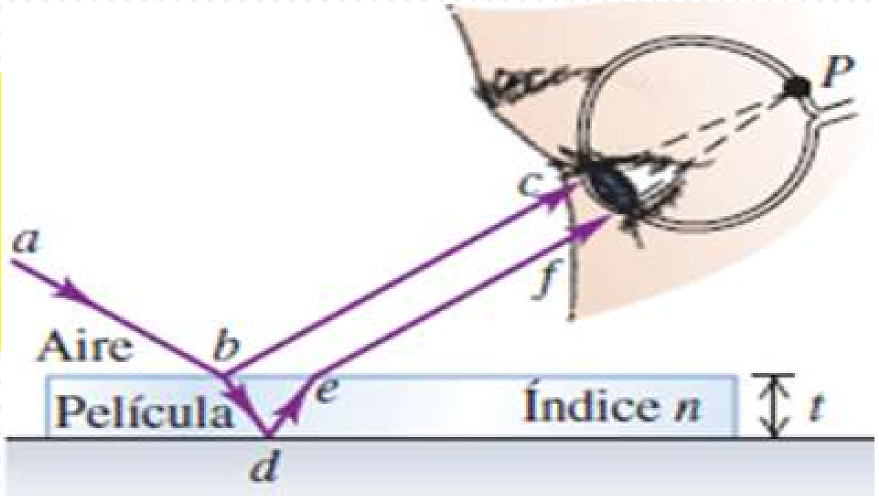
INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS

Efectos de interferencia se observan en películas delgadas (espesor del orden de λ), como en capas finas de aceite sobre agua o en la superficie de una pompa de jabón.
Los colores que se ven cuando incide luz blanca sobre estas películas resultan por la interferencia de ondas que se reflejan desde las dos superficies de la película.

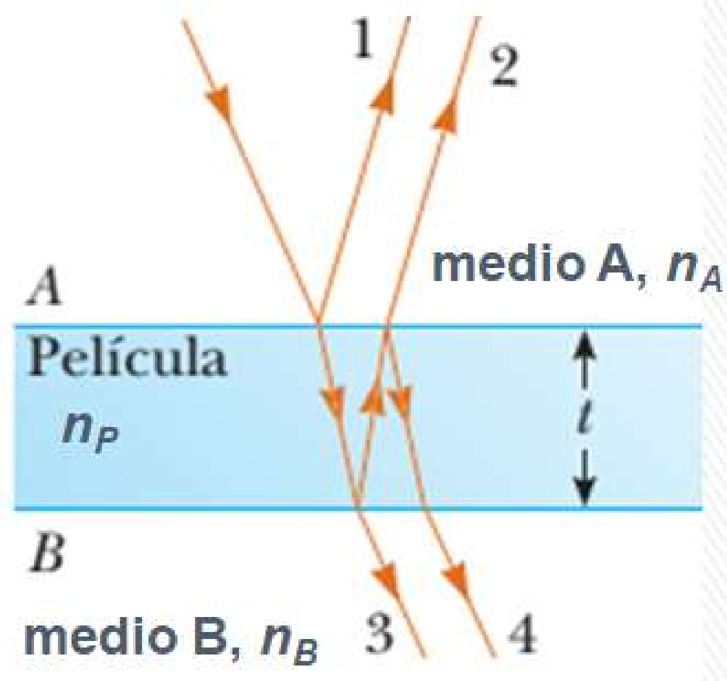
La luz que ilumina la cara superior de una película delgada con espesor *t se refleja parcialmente en esa superficie (trayectoria abc).*
La luz transmitida a través de la superficie superior se refleja parcialmente en la superficie inferior (trayectoria *abdef).*
Las dos ondas reflejadas llegan juntas al punto P en la retina del ojo y dependiendo de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva.

Cuando hay una reflexión en una interfase donde $n_1 < n_2$ se produce un cambio de fase de 180° en la onda reflejada, lo que equivale a media longitud de onda.

Por ejemplo hay cambio de fase en 180° si incide desde el aire al agua, pero no viceversa.



INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS



Si la película tiene espesor t, la luz tiene incidencia normal y longitud de onda **λ_n en la película**; **si ninguna o si ambas ondas reflejadas en las dos superficies tienen un desplazamiento de fase de medio ciclo por reflexión**, las condiciones para que haya interferencia constructiva y destructiva son las siguientes (las habituales):

Reflexión constructiva

$$2t = m\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Reflexión destructiva:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Si $n_A > n_P$ y $n_P > n_B$ no hay ninguna, o si $n_A < n_P$ y $n_P < n_B$ hay 2 cambios de fase

Si **una de las dos ondas tiene un desplazamiento de fase de medio ciclo por reflexión**, las condiciones para que haya interferencia constructiva y destructiva se invierten:

Reflexión constructiva $$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Reflexión destructiva: $$2t = m\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Si $n_A < n_P$ y $n_P > n_B$ o si $n_A > n_P$ y $n_P < n_B$ hay 1 cambio de fase

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.6

Una película de índice de refracción 1,33 y espesor 320 nm está suspendida en el aire. Si luz blanca incide normalmente sobre ella, ¿qué color tendrá la luz reflejada?

Rangos aproximados de longitud de onda para el espectro visible:
$\lambda_{violeta}$=380-430nm, $\lambda_{añil}$=430-450nm, λ_{azul}=450-500nm, $\lambda_{celeste}$=500-520nm, λ_{verde}=520-565nm, $\lambda_{amarillo}$=565-590nm, $\lambda_{naranja}$=590-625nm, λ_{rojo}=625-780nm.

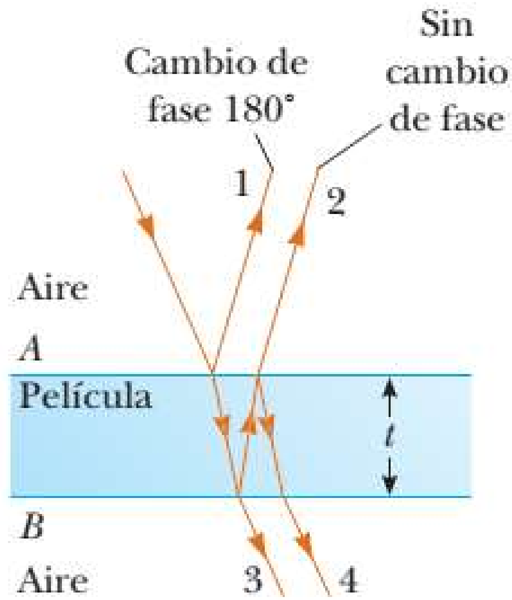
n = 1,33; t = 320 nm

Interfase: aire-agua hay cambio de fase en 180°

Interfase: agua-aire no hay cambio de fase en 180°

La condición de máximos es entonces:

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \ldots$$



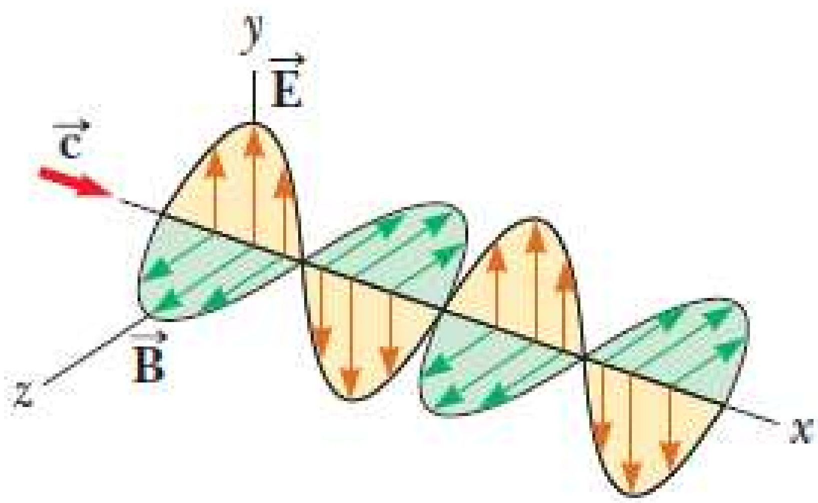
$$\lambda = \frac{2nt}{\left(m+\frac{1}{2}\right)} = \frac{2(1{,}33)(320)}{\left(m+\frac{1}{2}\right)}$$

m	λ (nm)	
0	1702,40	no visible
1	567,47	visible
2	340,48	no visible

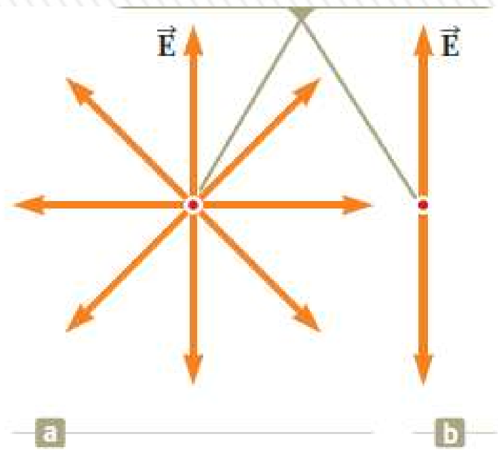
λ = 567 nm: amarillo

POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

La luz es una onda electromagnética, y por tanto transversal, con los vectores de campo eléctrico **E** y magnético **B** asociados con la onda perpendiculares entre sí y también con la dirección de propagación de la onda.
Un haz de luz ordinario consiste en un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos o moléculas de la fuente de luz.



Las cargas asociadas a los átomos vibran y actúan como pequeñas antenas emisoras y cada átomo produce una onda con su propia orientación de **E**, que corresponde a la dirección de vibración atómica.
La *dirección de polarización de cada una de las ondas individuales se* define como la dirección en la que vibra su campo eléctrico.

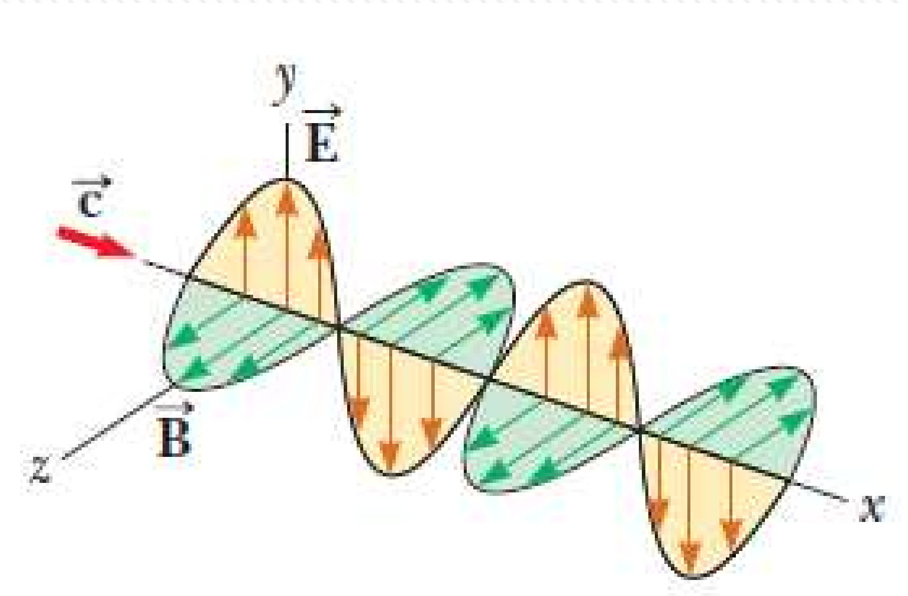


El resultado es una onda de luz **no polarizada**, figura a. *Todas las direcciones de* ***E*** son de igual forma probables y están en un plano (el plano de la página) perpendicular a la dirección de propagación.

Una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico **E** vibra en la misma dirección *en todo momento en un punto particular, figura* b. A veces se describe como *polarizada plana o sólo polarizada.*

POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

Esta onda está linealmente polarizada en la dirección *y*. *Conforme la onda se propaga en la dirección x*, ***E*** siempre está en la dirección *y*. El plano que forma **E** y la dirección de propagación se llama ***plano de polarización de la onda (plano xy).***
Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de un haz no polarizado al remover todas las ondas del haz excepto aquellas con vectores de campo eléctrico que oscilan en un solo plano.

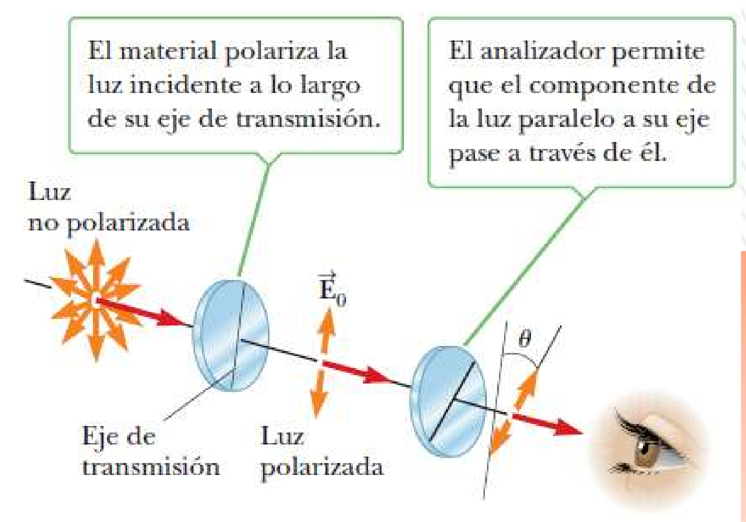


Existen cuatro formas de para realizar una polarización, por:
1) absorción selectiva,
2) reflexión,
3) doble refracción y
4) dispersión (o scattering).

En esta presentación veremos solamente las dos primeras.

Polarización por absorción selectiva

Técnica más común para polarizar luz.
Se es usa un material que transmite ondas que tengan vectores de **E** que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban las ondas con vectores de **E** que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección (1932 – **Polaroid).**
La conducción tiene lugar a lo largo de las cadenas de hidrocarburos, debido a que los electrones de valencia de las moléculas se pueden mover con facilidad sólo a lo largo de dichas cadenas. Así, las moléculas *absorben luz que tiene un vector de campo eléctrico paralelo a las cadenas* y *transmiten luz con un vector de campo eléctrico perpendicular a las cadenas.*
La dirección perpendicular a las cadenas moleculares es el **eje de transmisión.**
Idealmente se absorbe toda la luz con **E** perpendicular al eje de transmisión.
Los polarizadores reducen la intensidad de la luz que pasa a través de ellos.



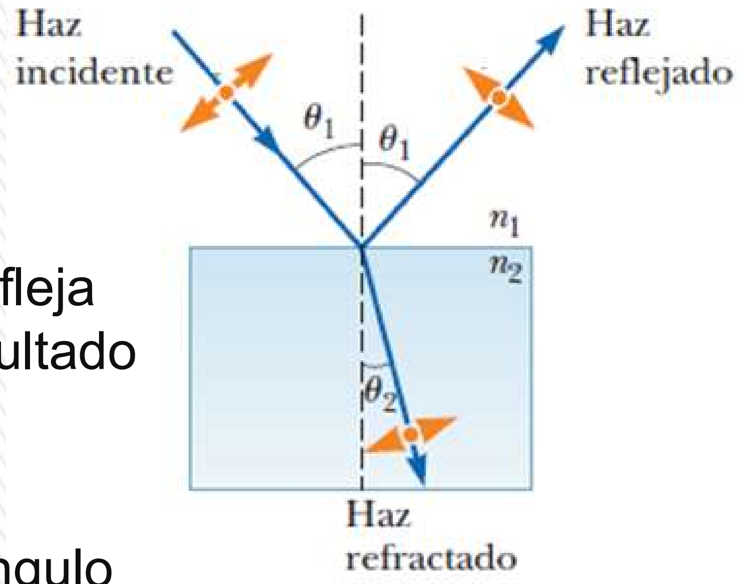
La componente de $\mathbf{E_0}$ perpendicular al eje del analizador se absorbe por completo, mientras que la componente de $\mathbf{E_0}$ paralela al eje del analizador, *$E_0 \cos\theta$, se transmite a través del analizador.*

Se cumple la **Ley de Malus** $I = I_0 \cos^2 \theta$
I_0 intensidad incidente sobre el analizador.
Si la luz no polarizada de intensidad *I_0 se envía a través de un solo polarizador* ideal, la luz linealmente polarizada que se transmite tiene intensidad *$I_0/2$.*

Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada se puede polarizar total o parcialmente o no polarizar, según el ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia vale 0° o 90° el haz reflejado no se polariza.

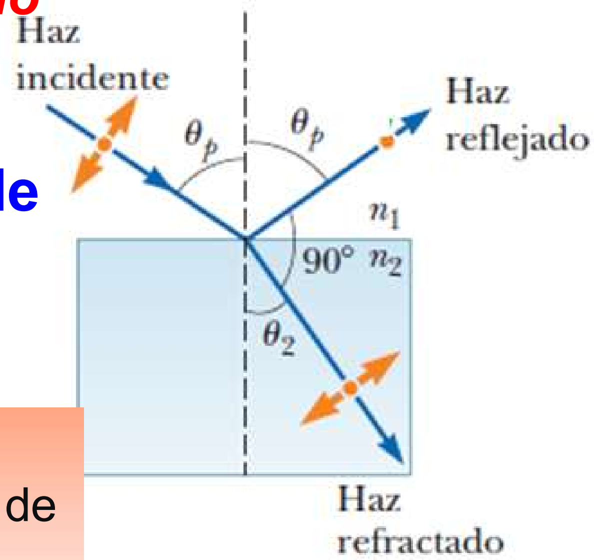
Para ángulos de incidencia entre 0° y 90°, hay una polarización parcial, pero **para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado se polariza totalmente**.



Resulta que la componente paralela a la interfase se refleja con más intensidad que las otras componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado.
El haz refractado también se polariza parcialmente.

Si variamos el ángulo de incidencia, θ_1, hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado vale 90°, ***el haz reflejado está completamente polarizado***, *con su* vector ***E*** paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado. A este ángulo de incidencia se le llama **ángulo de polarización θ_P** o **ángulo de Brewster**
Se cumple la **ley de Brewster:**

$$\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$$



La luz solar que se refleja del agua, vidrio o nieve es parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector de campo eléctrico de la luz reflejada tiene un fuerte componente horizontal.

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

a) Luz no polarizada pasa a través de dos hojas Polaroid. El eje de transmisión del analizador forma un ángulo de 35,0° con el eje del polarizador.
¿Qué fracción de la luz no polarizada original se transmite a través del analizador y qué fracción de la luz original se absorbe en el analizador?

Por la ley de Malus, la fracción de la intensidad de la luz no polarizada incidente que se transmite por el polarizador vale: $I_0/2$.
Esta fracción es la que llega al segundo Polaroid (analizador).
La intensidad que sale de este analizador vale:

$$I = (I_0/2)\cos^2\theta = (I_0/2)\cos^2 35{,}0° = 0{,}336\, I_0$$

Se transmite un 33,6% de la intensidad incidente por parte del analizador.

Como sobre el analizador incidió un 50,0% de la intensidad inicial y se transmitió un 33,6 %, la cantidad absorbida fue del 16,4%.

El analizador absorbe 16,4% de la intensidad incidente.

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

b) El ángulo crítico para reflexión interna total para zafiro rodeado por aire es 34,4°. Calcule el ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire.

El ángulo crítico para la reflexión interna total está dado por: $n_1 . 1 = n_2 . \text{sen}\theta_{CRIT}$

por tanto en nuestro caso, considerando que . $n_1 = n_{aire} = 1$, y que $n_2 = n_{zafiro}$:

$$n_{zafiro} = \frac{1}{sen\theta_{CRIT}} = \frac{1}{sen34{,}4°} = 1{,}7700$$

Ley de Brewster: $\tan\theta_P = \dfrac{n_2}{n_1}$

$$\theta_P = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \tan^{-1}(n_{zafiro}) = \tan^{-1}(1{,}770) = 60{,}53°$$

Ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire: 60,5°.